

Influence of terrain roughness on boundary layer simulation in wind tunnel

Wpływ chropowatości terenu na symulację warstwy przyziemnej w tunelu aerodynamicznym

This dissertation mainly concerns experimental model tests in a wind tunnel. It is focused on the simulation of wind flow characteristics over different types of terrain roughness in a boundary layer wind tunnel. The motivation and importance of this work stem from the fact that wind tunnel tests are still the main research device for determining wind action on structures, which is particularly important in the case of tall buildings or large-span roofs. The work consists of 11 chapters.

The first two chapters, *Introduction* and *Theses and scientific originality of the work*, are dedicated to outlining the aims, motivation and problems to be undertaken in the thesis and highlighting its novelty. The main aim of this work is to find the most suitable arrangements of the turbulence-generating elements for simulating wind conditions associated with different terrain roughness categories in a wind tunnel. The secondary aim is the provision of more clear classification of terrain roughness.

The 3rd chapter, *Theoretical foundations and state of the art*, provides the essential information and formulas regarding wind flow characteristics, terrain roughness and wind tunnel simulation techniques. The described parameters, which will be subject to further analysis, are vertical mean wind speed and turbulence intensity profiles, longitudinal and vertical turbulence length scales, power density spectra, vertical co-coherence functions and frequency length scales. Terrain roughness categories and their implications on the wind flow characteristics are compared between different sources. This chapter also discusses the practical aspects of wind flow simulation and forming the air stream in wind tunnels.

In chapter 4, *Proposition of unification of terrain roughness classifications*, an authorial classification of the terrain roughness categories is proposed, which is based on various standards and analysis of the models of real-life areas. The aim of this classification is a more accurate description of the terrain roughness for the purposes of wind tunnel tests. The main novelty of this classification is the distinction between more categories related to suburban and urban terrain types. Moreover, the classification is based on two roughness parameters.

Chapter 5, *Wind tunnel simulations of different boundary layer types*, describes the experimental setup, measurement error assessment, formulation of the model scales used in the tests and a summary of the arrangements of different roughness elements used in the tests. The tests consisted of wind pressure measurements at 12 points arranged in a vertical setup. A total of 295 test cases were investigated in this work.

The results of these tests are processed according to the method presented in chapter 6, *Method applied for the results processing*. A comprehensive script in *MATLAB* was prepared that allows for the robust calculation of all the analysed wind flow characteristics from the obtained measurements. Furthermore, a Multi Attribute Decision Making method was applied to select the test cases that best match the wind flow characteristics of different terrain roughness categories according to the standards (PN-EN 1991-1-4, ISO 4354, ASCE/SEI-7).

The next two chapters are intended for the analysis of the tests results. Chapter 7, *Effects of roughness elements on different wind flow characteristics*, presents a study of the impact of different turbulence-generating elements – blocks, barriers, spires and a turbulising net – on some of the key wind flow characteristics related to the vertical mean wind speed and turbulence intensity profiles, turbulence length scales and frequency length scales. The 8th chapter, *Results discussion and analysis for selected cases*, analyses in detail the five test cases that were chosen as representative for each of the terrain roughness

categories according to the Eurocode. All the relevant plots are shown and discussed, the suitability of the simulations is evaluated and comparisons with various theoretical models are made.

The outcomes of the dissertation are summarised in the 9th chapter, *Conclusions and final remarks*. They are divided into four subsections, each one focused on a different aspect of the work. The first subsection lists the conclusions regarding the proposed terrain roughness classification. The second one sums up the findings about the simulation of different types of the atmospheric boundary layer in the wind tunnel. Brief guidelines for the proper simulation of various wind flow characteristics are formulated in the third subsection. The final subsection of this chapter outlines the plans for future research on the topics addressed in this work.

The last two subsections, *Literature* and *Attachments*, provide the bibliography for this dissertation and the list of enclosed attachments. These attachments are the complete *MATLAB* script used for the results processing, the spreadsheet with complete results of every test case and plots of all measuring signal and wind flow characteristics for the test cases chosen as most representative for each terrain category according to different standards.

Keywords: wind engineering, wind tunnel tests, boundary layer simulation, wind flow characteristics, terrain roughness.

Szczegółowe streszczenie w języku polskim (Extended abstract in Polish)

Praca ma przede wszystkim charakter eksperymentalny i dotyczy tematyki badań modelowych w tunelu aerodynamicznym. Głównym aspektem badawczym pracy jest symulacja struktury przepływu wiatru nad terenami o różnej chropowatości w tunelu aerodynamicznym z warstwą przyścienną. Tego typu tunele wykorzystywane są do badania zagadnień inżynierii wiatrowej związanej głównie z działaniem wiatru na obiekty budowlane, ludzi oraz do celów energetyki wiatrowej. Główną motywacją do podjęcia tej tematyki w pracy doktorskiej jest wciąż dominująca rola badań modelowych w celach wyznaczania działania wiatru na konstrukcje, kluczowa szczególnie w przypadku budynków wysokościowych lub przekryć o dużej rozpiętości. Praca liczy 11 rozdziałów. Poniżej znajduje się opis zawartości każdego z nich.

Rozdział pierwszy określa cele i motywacje powstania pracy. Głównym celem pracy jest znalezienie najbardziej odpowiednich ustawień elementów generujących turbulencję w tunelu aerodynamicznym (takich jak wysuwane klocki, iglice, bariery i siatka turbulizacyjna) do odwzorowania struktury przepływu powietrza charakterystycznej dla różnych kategorii chropowatości terenu. Drugim celem pracy jest zaproponowanie bardziej przejrzystej klasyfikacji chropowatości terenu.

W drugim rozdziale sformułowane są tezy pracy oraz jej naukowa oryginalność. Następujące tezy zostały postawione w niniejszej dysertacji:

1. Dodatkowe parametry służące do opisu chropowatości terenu mogą prowadzić do lepszej identyfikacji i klasyfikacji rzeczywistych lokalizacji do celów badań modelowych w tunelach aerodynamicznych.
2. Istnieje możliwość oceny wpływu różnych elementów turbulizujących, takich jak klocki, iglice i bariery, na różne charakterystyki przepływu. Takie podejście może poskutkować bardziej precyzyjną symulacją warstwy przyziemnej w tunelach aerodynamicznych.

Rozdział trzeci zawiera teoretyczne podstawy dotyczące struktury wiatru, przegląd i porównanie informacji na temat chropowatości terenu według różnych źródeł oraz zestawienie informacji na temat sposobów symulacji struktury przepływu w warstwie przyziemnej w tunelach aerodynamicznych. Najważniejszymi charakterystykami wiatru, na których skupia się praca, są: pionowe profile średniej prędkości wiatru i intensywności turbulencji, podłużne (wynikające z czasowej autokorelacji) i pionowe (wynikające z korelacji przestrzennej) skale długości turbulencji, gęstości widmowe mocy, koherencja zwyczajna i skale częstotliwości. Przeprowadzone porównania dotyczą najważniejszych charakterystyk przepływu i dotyczą różnych typów chropowatości terenu oraz obejmują normy PN-EN, ISO, ASCE/SEI i ESDU. Ostatnia część rozdziału szczegółowo opisuje formowanie przepływu i generację struktury wiatru w tunelach aerodynamicznych metodami pasywnymi oraz krótko charakteryzuje rzadziej stosowane metody aktywne.

Na podstawie literatury oraz obliczeń dotyczących modeli rzeczywistych lokalizacji, w rozdziale czwartym wprowadzono autorską klasyfikację chropowatości terenu, która wyróżnia łącznie 8 różnych kategorii terenu. Klasyfikacja ta skupia się głównie na terenach miejskich i podmiejskich, wprowadzając dodatkowe rozróżnienie oparte o charakter przeszkód. Poszczególne typy terenu zdefiniowane są na podstawie dwóch wartości: średniej wysokości chropowatości (parametru wymiarowego) oraz stosunku odchylenia standardowego wysokości chropowatości do średniej wysokości chropowatości (parametru bezwymiarowego). Takie określenie kategorii chropowatości skutkuje jednoznacznym i klarownym przyporządkowaniem dowolnego terenu do dokładnie jednej kategorii chropowatości. Pozwala przy tym na rozróżnienie pomiędzy terenami o gęstej, jednorodnej pod względem wysokości zabudowie i terenami o dużej rozbieżności wysokości zabudowy (np. centra dużych miast o szerokich ulicach i budynkach wysokościowych).

W rozdziale piątym przedstawiono opis eksperymentu. Kolejno opisane jest stanowisko pomiarowe – tunel aerodynamiczny Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Politechniki Krakowskiej, aparatura – miniaturowe

skanery ciśnień wraz z modułem pomiarowym, parametry pomiaru i przypadki badawcze. Dokonano tutaj także analizy potencjalnych błędów pomiarowych. Łącznie przebadano 295 różnych kombinacji klocków na wlocie do tunelu i na długości przestrzeni pomiarowej, iglic, barier i siatki turbulizacyjnej. Dokładne zestawienie wszystkich przypadków badawczych znajduje się w Załączniku nr 2 do niniejszej pracy, gdzie również zamieszczono szczegółowe wyniki dla każdego przypadku.

Rozdział szósty szczegółowo opisuje proces opracowania wyników badań. W rozdziale tym przedstawione i wyjaśnione są poszczególne części przygotowanego skryptu w programie *MATLAB*, który został wykorzystany do automatyzacji tego opracowania. Skrypt ten przeprowadza filtrację sygnału pomiarowego (wartości ciśnień), na ich podstawie wyznacza przebieg czasowy prędkości przepływu w każdym punkcie i oblicza wartość średnią i odchylenie standardowe. Następnie wyznaczane są podstawowe charakterystyki struktury przepływu w warstwie przyziemnej: pionowe profile średniej prędkości wiatru i intensywności turbulencji. Parametry tych profili wykorzystywane są do przyporządkowania danego przypadku badawczego do odpowiedniej kategorii chropowatości terenu według różnych norm. W kolejnych krokach obliczane są pozostałe charakterystyki przepływu: autokorelacja, skale długości turbulencji w kierunkach podłużnym i pionowym, gęstości widmowe mocy, koherencja zwyczajna i skale częstotliwości. Skrypt ponadto automatycznie tworzy i zapisuje wykresy dla każdej z tych charakterystyk i zapisuje wyniki w arkuszu kalkulacyjnym. Druga część tego rozdziału poświęcona jest doborze przypadków badawczych, w których zasymulowana struktura przepływu najbardziej odpowiada poszczególnym kategoriom chropowatości według różnych norm. Dla kategorii, do których przyporządkowano największą liczbę przypadków badawczych i gdzie istniały podstawy do selekcji na podstawie wielu argumentów, zastosowano wielokryterialną metodę wspomagania decyzji TOPSIS.

Rozdział siódmy zawiera wyczerpującą analizę wpływu różnych elementów generujących turbulencję w tunelu aerodynamicznym na poszczególne charakterystyki przepływu. Analiza ta dotyczy kolejno parametrów związanych z pionowymi profilami średniej prędkości wiatru i turbulencji, skali długości turbulencji i skali częstotliwości. Porównania dokonywane są najpierw dla różnych wysokości klocków przy tej samej konfiguracji iglic i barier, a następnie porównywany jest wpływ różnych wysokości iglic przy tych samych barierach oraz różnych typów barier przy tych samych iglicach. Analiza ta pozwala na znalezienie prawidłowości rządzących wpływem tych elementów na strukturę wiatru, a w konsekwencji na sformułowanie wytycznych dotyczących symulacji różnych typów warstwy przyziemnej atmosfery w tunelu aerodynamicznym.

W ósmym rozdziale są natomiast zestawione wykresy dotyczące wszystkich analizowanych charakterystyk przepływu dla pięciu przypadków badawczych, które zostały wybrane jako najlepiej odwzorowujące poszczególne kategorie chropowatości terenu według PN-EN 1991-1-4. Dane te opatrzone są szczegółowym komentarzem, dokonano oceny dokładności symulacji dla każdej z kategorii i porównania z modelami teoretycznymi. Dla kategorii terenu odpowiadającym terenom otwartym, przedmieściom i miastom uzyskano bardzo dobrą precyzję symulacji, natomiast dla kategorii odpowiadającym terenom z dostępem do otwartego morza i terenom blisko jezior lub z pomijalnie niewielką roślinnością – wystarczającą dobrą precyzję.

Podsumowanie i wnioski końcowe z pracy zawarte są w rozdziale dziewiątym. Pierwsza część tego rozdziału skupia się na wnioskach dotyczących wprowadzonej klasyfikacji chropowatości terenu. Podsumowaniem tej części jest wykazanie, że pierwsza teza pracy jest prawdziwa. W drugiej części zestawione są konkluzje dotyczące symulacji struktury wiatru w tunelu aerodynamicznym. Ta część stanowi podstawę do udowodnienia drugiej tezy pracy. Następnie sformułowane zostały wytyczne dotyczące symulacji warstwy przyziemnej w tunelach aerodynamicznych, uwzględniające zaobserwowane możliwości sterowania niektórymi z jej charakterystyk poprzez odpowiedni dobór elementów turbulizujących. Ostatnia część tego rozdziału przedstawia planowane dalsze kierunki badań w tematyce poruszanej w niniejszej pracy. Kierunki te dotyczą pomiarów profili wiatru w skali rzeczywistej w celu

walidacji zaproponowanej klasyfikacji chropowatości terenu, dodatkowych możliwości identyfikacji parametrów chropowatości terenów dla rzeczywistych lokalizacji, wykorzystania zaproponowanej metody symulacji do testowania i kalibracji innych tuneli aerodynamicznych oraz wyprowadzenia bardziej szczegółowych modeli działania wiatru na konstrukcje budowlane.

Dwa ostatnie rozdziały zawierają bibliografię, na której opierano się podczas przygotowywania niniejszej dysertacji oraz listę załączników. Załączniki do pracy to pełny skrypt do programu *MATLAB* wykorzystany do opracowania wyników, arkusz kalkulacyjny z dokładnym zestawieniem wszystkich przypadków badawczych i uzyskanych dla nich wyników oraz zbiór wykresów dla każdego przypadku, który został wybrany jako reprezentatywny dla jednej z kategorii chropowatości terenu według różnych norm.

Słowa kluczowe: inżynieria wiatrowa, badania w tunelu aerodynamicznym, symulacja warstwy przyziemnej, struktura przepływu powietrza, chropowatość terenu.